

## RESUME

Les signatures géochimiques des roches et des minéraux (par exemple, le zircon et l'apatite) sont couramment utilisées dans l'exploration des gisements de cuivre porphyrique (PCD). Ces techniques ont été appliquées au Complexe Volcanique - sans minéralisations cuprifères - Chachimbiro (CVC) et au prospect Cerro Tolondro (CT) potentiellement minéralisé, dans le nord de l'Équateur. Cette étude vise à comprendre la relation entre les grandes éruptions volcaniques et la formation des PCD.

Le CVC est un volcan composite situé dans la Cordillère occidentale du nord de l'Équateur, avec trois événements éruptifs du Pléistocène (CH1-CH2-CH3) et une quatrième explosion latérale de l'Holocène (CH4) (Bellver Baca et al., 2020). Le CT correspond à un site prospectif composé d'andésites (unité andésitique) et de dacites, avec une texture porphyrique et une granulométrie variante entre des grains fins (Fine Dacitic Porphyry ou FDP) et des grains moyens (Medium Dacitic Porphyry ou MDP). Les premiers âges U - Pb obtenus (sur zircon) pour le CT ont été déterminés à  $11,40 \pm 0,13$  Ma pour le FDP,  $11,40 \pm 0,32$  Ma pour l'unité Andésitique, et  $7,20 \pm 0,13$  Ma pour le MDP.

La géochimie réalisée sur roche totale et sur zircon pour le CVC, montre un fractionnement du clinopyroxène  $\pm$  amphibole de CH1-CH3, se déplaçant vers une empreinte géochimique de fractionnement du zircon  $\pm$  grenat vers CH4. Le CT présente quant à lui une tendance du fractionnement de l'amphibole  $\pm$  titanite ( $\pm$  grenat). Sur la base des éléments traces mesurés dans les zircons, le CVC et le CT se situent dans le même domaine que les PDC minéralisés. Néanmoins, l'état d'oxydation du CVC et CT, donné par le  $\Delta$ FMQ (basé sur Louck et al., 2020), est significativement plus bas que ceux observés dans les PCD. Cela suggère la présence d'une phase porteuse de Ce co-

crystallisant avec le zircon, le cérium étant le facteur de fluctuation dans l'équation de Louck et al. (2020).

La chimie minérale de l'apatite a été utilisée pour évaluer le potentiel des éléments volatiles de l'apatite (par exemple S, Cl, F) en tant qu'indicateurs géochimiques des magmas stériles par rapport aux magmas fertiles. Le CVC présente deux tendances claires: des apatites à teneur variable en Cl et riches en F (CH2-CH3), et des apatites pauvres en Cl et en F (CH4). D'autre part, les apatites de CT présentent trois groupes différents : des apatites riches en Cl et F (unité Andésitique), des apatites à teneur variable en Cl et riches en F (FDP), et d'autres pauvres en Cl et en F (MDP). Pour comprendre le comportement des rapports entre le Cl et le F au cours de l'évolution du magma, nous avons modélisé l'évolution du magma dans des conditions permettant la cristallisation de l'apatite, en utilisant une approche Monte Carlo similaire à celle de Li et al. (2022). Les résultats indiquent que le passage d'une situation riche en Cl-F à une situation pauvre en Cl-F est la conséquence d'une augmentation de la pression et du contenu en eau du magma, un processus qui pourrait être induit par l'approfondissement d'une chambre magmatique parentale. Les gisements de porphyres cuprifères pris comme référence, coïncident avec les apatites riches en Cl-F de l'unité Andésitique du CT. Ceci suggère que l'apatite des prospectus minéralisés tend à cristalliser à partir d'un magma riche en Cl, donc avant tout processus d'exsolution des fluides magmatiques. Nous avons également mesuré la teneur en soufre des apatites. Pour le CVC, les valeurs sont faibles, mais se situent dans le spectre des données de la suite stérile. En revanche, pour le CT, les valeurs sont similaires à celles des grands gisements de porphyres cuprifères, ce qui souligne l'importance de l'évaluation de la teneur en soufre des apatites lors des études de la fertilité du magma. **Mots-clés : Fertilité du magma, gisements de cuivre porphyrique, géochimie, exploration, Équateur.**

## Abstract

Bulk rock and mineral geochemical signatures (e.g., zircon and apatite) commonly used in the exploration for porphyry copper deposits (PCDs) have been applied to the barren Chachimbiro Volcanic Complex (CVC) and the potentially mineralized Cerro Tolondro (CT) prospect, northern Ecuador. This application aims to understand the relationship between big volcanic eruptions and the formation of PCDs.

CVC is a compound volcano located in the Western Cordillera of northern Ecuador, with three Pleistocene eruptive events (CH1-CH2-CH3) and a fourth Holocene lateral blast explosion (CH4) (Bellver-Baca et al., 2020). CT corresponds to a prospective site consisting of andesites (Andesite unit) and dacites, with porphyritic texture and a granulometric difference between fine (Fine Dacitic Porphyry or FDP) to medium (Medium Dacitic Porphyry or MDP) grain. The first U – Pb ages for CT were determined, obtaining  $11.53 \pm 0.13$  Ma for the FDP,  $11.40 \pm 0.32$  Ma for the Andesite unit, and  $7.20 \pm 0.13$  Ma for the MDP.

Whole-rock and zircon geochemistry from CVC displays a clinopyroxene  $\pm$  amphibole fractionation from CH1-CH3, shifting towards zircon  $\pm$  garnet ( $\pm$  amphibole) fractionation geochemical imprint towards CH4. Meanwhile, Cerro Tolondro exhibits an amphibole  $\pm$  titanite ( $\pm$ garnet) fractionation trend. Based on trace elements measured in zircons, both CVC and CT fall within the same field as mineralized PCDs. Nevertheless, the oxidation state of CVC and CT, given by the  $\Delta$ FMQ (based on Louck et al., 2020), is significantly lower than those observed in PCDs. This suggests the possible presence of a Ce-bearing phase co-crystallizing with zircon, as cerium is the fluctuating factor in Louck et al. (2020) equation.

Apatite mineral chemistry was used to assess the potential of apatite volatile (e.g., S, Cl, F) elements as geochemical indicators of barren versus fertile magmas. The CVC display two clear trends; Cl-varying and F-rich (CH2-CH3), and Cl-F-poor apatites (CH4). On the other hand, CT'S apatites exhibit three different behaviors; Cl-F-rich (Andesite), Cl-varying and F-rich (FDP), and Cl-F-poor apatites (MDP). To understand the behavior of Cl – F ratios during magma evolution, we modelled the melt evolution under apatite-bearing conditions using a Monte Carlo approach similar to that of Li et al. (2022). The results indicate that in both cases, the shift from Cl-F rich to Cl-F poor is a consequence of an increase in the pressure and magmatic water of the magma, a process that could be induced by the deepening of a parental magma chamber. Porphyry copper deposits taken as reference coincides with the Cl-F rich suite of the Andesite from CT leading us to theorize that apatite from mineralized prospects tends to crystallize from a Cl-rich melt, before any fluid exsolution process. We also measured the sulfur content in the apatites. For CVC, the values are low but within the spectrum of barren suite data. On the other hand, CT has values similar to those of large porphyry copper deposits, which emphasized the importance of assessing the sulfur content in apatites when studying magma fertility.

***Keywords: Magma fertility, Porphyry Copper Deposits, Geochemistry, Exploration, Ecuador.***